

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(43) 国際公開日
2001年8月23日 (23.08.2001)

PCT

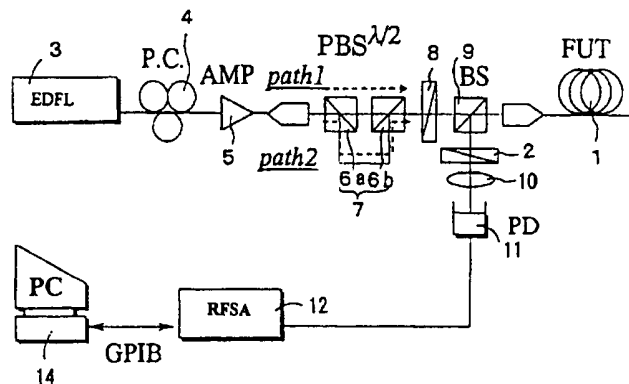
(10) 国際公開番号
WO 01/61303 A1

- (51) 国際特許分類: G01M 11/02
- (21) 国際出願番号: PCT/JP00/06509
- (22) 国際出願日: 2000年9月22日 (22.09.2000)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願2000-42175 2000年2月21日 (21.02.2000) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 科学技術振興事業団 (JAPAN SCIENCE AND TECHNOLOGY CORPORATION) [JP/JP]; 〒332-0012 埼玉県川口市本町4-1-8 Saitama (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 伊藤弘昌 (ITO, — 添付公開書類: 国際調査報告書
- (74) 代理人: 橋爪 健 (HASHIZUME, Takeshi); 〒104-0061 東京都中央区銀座3丁目13番17号 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (国内): US.
- (84) 指定国 (広域): ヨーロッパ特許 (DE, FR, GB, SE).

[続葉有]

(54) Title: POLARIZATION MODE DISPERSION MEASURING DEVICE AND POLARIZATION MODE DISPERSION MEASURING METHOD

(54) 発明の名称: 偏波モード分散測定装置および偏波モード分散測定方法



FSFレーザによるPMD測定系

FSF LASER-BASED PMD MEASURING SYSTEM

(57) Abstract: A method capable of measuring polarization mode dispersion (PMD) with simple techniques and high sensitivity. A polarization mode dispersion measuring device comprising an FSF laser (FSFL)(3) for generating a frequency chirp light, an optical amplifier (AMP) (5) for amplifying the frequency chirp light, an offset circuit (7), a $\lambda/2$ plate (8), a beam splitter (BS) (9), an analyzer (2) for retrieving polarization components required for measuring from each light wave after propagating through fast axis and delay axis of an optical fiber to be measured (1), a lens (10), a photodetector (PD) (11) for detecting a light wave passed through the lens (10), and an RF spectrum analyzer (RFSA) (12) for observing a spectrum waveform of the light wave. Since a frequency chirp light, after propagating through the optical fiber to be measured (1) and passing through the analyzer (2), is detected and a variation in best frequency is measured to determine a PMD value, a PMD value can be determined simply and with high sensitivity.

[続葉有]



2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

(57) 要約:

簡易な手法で高感度に偏波モード分散(PMD)測定を行うことを可能とする。本発明の偏波モード分散測定装置は、周波数チャープ光を生成するFSFLレーザ(FSFL)3と、周波数チャープ光を増幅する光増幅器(AMP)5と、オフセット回路7と、 $\lambda/2$ 板8と、ビームスプリッタ(BS)9と、被測定光ファイバ1の速波軸および遅波軸を伝搬後の各光波から測定に必要な偏光成分を取り出す検光子2と、レンズ10と、レンズ10を透過した光波を検出する光検出器(PD)11と、光波のスペクトル波形を観測するRFスペクトルアナライザ(RFSA)12とを備える。周波数チャープ光が被測定光ファイバ1を伝搬後、さらに検光子2を透過した後で検波し、ビート周波数の変化量を測定してPMD値を求めるため、簡易かつ高感度にPMD値を求めることができる。

明 細 書

偏波モード分散測定装置および偏波モード分散測定方法

5 技術分野

本発明は、光伝送用ファイバの分散特性のうち、特に偏波モード分散を測定する偏波モード分散測定装置および偏波モード分散測定方法に関する。

10 背景技術

長距離光通信の分野では、伝送速度の高速化に伴って、光伝送用ファイバの分散特性の管理が重要な課題になっている。分散の要因の一つに偏波モード分散(PMD : Polarization Mode Dispersion)があり、これは直交する2つの偏波モード間の群遅延によるものである。

通常の光通信で用いられる光ファイバは、熱、張力、圧力といった様々な外部応力によりコア径が理想的な円形から崩れ、コア内部に複屈折性が存在し、PMDが生じる。PMDは高速光通信において伝送容量制限の要因になるため、PMDの管理の必要性が近年高まってきている。

PMD測定には、大きく分けて時間領域による測定と、周波数領域による測定方法があり、前者には干渉法、後者には固定アナライザ法およびポラリメトリック法（ポアンカレ球法、ジョーンズマトリクス（JME）法、SOP（State of Polarization）法等がある。しかし、これらの測定方法では、被測定光ファイバの出力端に光検出系を配置する必要があるため、既設の光通信網での測定は困難であり、さらに測定系も複雑になる傾向がある。

本発明は、このような点に鑑みてなされたものであり、その目的は、簡易な手法で高感度にPMD測定を行うことが可能な偏波モード分散測定装置および偏波モード分散測定方法を提供することにある。また、本発明は、PMD値が小さい場合にも、発生するビート信号がDC成分の中に埋もれることなく、偏波モード分散測定を十分可能とすることを目的とする。

上述した課題を解決するために、本発明の第1の解決手段によると、

周波数が時間に比例して変化する周波数チャープ光を生成するチャープ光生成手段と、

前記チャープ光生成手段により生成された周波数チャープ光に対して、直交する2つの直線偏光成分に分岐して、両直線偏光成分に光路差を与えるオフセット手段と、

前記オフセット手段からの周波数チャープ光の直線偏光方向を所定の角度回転させる波長板と、

前記波長板を通過した周波数チャープ光が被測定光ファイバに伝搬した後に、測定に必要な偏光成分を透過する検光子と、

前記検光子を透過した光波を検波し、検波された光波のビート信号に基づいて、被測定光ファイバの偏波モード分散値を検出する検波手段と

を備えた偏波モード分散測定装置を提供する。

また、本発明の第2の解決手段によると、

周波数が時間に比例して変化する周波数チャープ光を生成するステップと、

生成された周波数チャープ光に対して、直交する2つの直線偏光成分に分岐して、
両直線偏光成分に光路差を与えるステップと、

- 5 周波数チャープ光の直線偏光方向を所定の角度回転させるステップと、

光路差を与えられた周波数チャープ光を被測定光ファイバに伝搬するステップ
と、

周波数チャープ光が被測定光ファイバに伝搬した後に、測定に必要な偏光成分を
透過するステップと、

- 10 透過した後の光波を検波し、検波された光波のビート信号に基づいて、被測定光
ファイバの偏波モード分散値を検出するステップと

を備えた偏波モード分散測定方法を提供する。

- また、本発明では、偏波モード分散により生ずる被測定光ファイバの速波軸およ
び遅波軸を伝搬する各光波間の群遅延時間を、各光波間で生ずるビート信号の周波
15 数より算出するため、感度よく偏波モード分散を算出できる。また、本発明では、
被測定光ファイバの速波軸および遅波軸に対して略45度の角度に設定した検光
子を設けるため、速波軸および遅波軸を伝搬する各光波から測定に必要な偏光成分
を取り出すことができる。

- また、本発明では、ドップラー効果により周波数シフトされた1次回折光を帰還
20 させて周波数チャープ光を生成することで、線形性に優れた周波数チャープ光を生
成できる。また、本発明では、所定の利得媒質、所定の励起光源、波長分割用光結
合器、出力カプラ、偏波制御素子、光アイソレータ、および周波数シフト素子をリ
ング状に接続したリング共振器により周波数チャープ光を生成することで、リング
共振器一周回ごとに、所定の周波数幅だけ高感度に周波数をシフトさせることがで
25 きる。

また、本発明では、オフセット手段で光路差を与えた2つの光波のビート周波数の変動量に基づいて偏波モード分散値を検出するため、簡易かつ高感度に偏波モード分散値を検出できる。また、本発明では、オフセット手段を透過した後の光波の入射角度によりビートスペクトル波形が異なることを考慮に入れ、入射角度に対するビートスペクトル強度に基づいてビート周波数の変化量を測定することができる。

図面の簡単な説明

10 図1は、本発明に係る偏波モード分散測定装置のPMD測定原理を説明する図である。

図2は、本発明に係る偏波モード分散測定装置の第1の実施形態の全体構成を示すブロック図である。

図3は、FSFレーザ出力の瞬時周波数成分を模式的に表した図である。

15 図4は、FSFレーザの詳細構成を示すブロック図である。

図5は、図4のFSFレーザの発振スペクトルを光スペクトラムアナライザで観測した結果を示す図である。

図6は、検波時の瞬時周波数成分を示す図である。

20 図7は、オフセット回路における光波及び検光子の透過成分についての説明図である。

図8は、光波の入射角度とビート強度との関係を示す図である。

図9は、(a)オフセット回路を透過した後の光波の入射角度とビートスペクトル強度との関係を示す図、及び、(b)オフセット回路を透過した後の光波の入射角

度とビート周波数との関係を示す図である。

図10は、(a)入射角度とビートスペクトル強度との関係を示す図、及び、(b)入射角度とビート周波数との関係を示す図である。

図11は、光ファイバ長とPMDとの関係を示す図である。

5 図12は、ビート周波数の読取精度を評価した結果を示す図である。

図13は、本発明に係る偏波モード分散測定装置の第2の実施形態の全体構成を示すブロック図である。

図14は、チャープ光生成手段の第2の実施の形態の構成図を示す図である。

図15は、チャープ光生成手段の第3の実施の形態の構成図を示す図である。

10

発明を実施するための最良の形態

以下、本発明に係る偏波モード分散測定装置および偏波モード分散測定方法について、図面を参照しながら具体的に説明する。

15 本発明は、特に光周波数領域リフレクトメトリ(OFDR: Optical Frequency Domain Reflectometry)を用いてPMD測定を行うようにした。具体的には、主に、PMDによって生じる伝搬時間の偏波状態依存性をビート周波数より求めるものである。光源には、本出願人が開発した周波数シフト帰還型レーザ(FSFレーザ: Frequency-Shifted Feedback laser)を使用し、被測定光ファイバの片側端面のみ
20 でPMD測定が可能でかつ簡便な偏波モード分散測定装置を用いるようにした。以下、本発明に係る偏波モード分散測定装置及びその方法について詳細に説明する。

図1は、本発明に係る偏波モード分散測定装置のPMD測定原理を説明する図であり、図1(a)は、光ファイバ1内を伝搬する光波の瞬時周波数成分を模式的に

示し、図1 (b) 及び (c) は、それぞれ、光ファイバ1 内に入射する周波数チャープ光の瞬時周波数、及び、光ファイバ1 内に伝播する周波数チャープ光の瞬時周波数を示している。ここで、周波数チャープ光とは、周波数が時間に応じて変化する光波をいう。

- 5 光ファイバ1 がPMDをもつ場合には、光ファイバ1 の速波軸および遅波軸を伝搬する各光波間に伝搬時間差が生じ、光ファイバ1 の伝搬後には図1 (c) のような特性になる。これら2つの光波は互いに直交しているので、これら光波から測定に必要な偏光成分を取り出すために、被測定光ファイバ (FUT) 1 の出射側に、速波軸および遅波軸に対して45度 (又は略45度) の角度に設定した検光子2 を配置
- 10 し、周波数チャープ光が被測定光ファイバ1 を伝搬後に、さらに検光子2 を透過した後の光波を検波する。このときに得られる自己ビート信号により、PMD値を検出することができる。

このようなPMD値の測定手法では、周波数チャープ光源の線形性が重要であり、線形性に優れたFSFレーザを使用することで、高精度のPMD測定が可能となる。

- 15 ここで、周波数チャープ光のチャープレートを γ 、OFDRにより生じるビート周波数を f_B とすると、PMD値 τ は (1) 式で与えられる。

$$\tau = f_B / \gamma \quad (1)$$

ここで、 $\gamma = \nu_{FS} / \tau_{RT}$

(τ_{RT} は共振器の周回時間、 ν_{FS} は共振器の周回当たりの周波数シフト量)

- 20 図2は、本発明に係る偏波モード分散測定装置の一実施形態の全体構成を示すブロック図である。同図の偏波モード分散測定装置は、周波数チャープ光を生成するFSFレーザ (FSFL: チャープ光生成手段) 3 と、偏波制御素子 (P.C.: Polarization Contoroller) 4 と、周波数チャープ光を増幅する光増幅器 (AMP) 5 と、周波数チャープ光の直交する2つの直線偏光成分に光路差を与える二個の偏
- 25 光ビームスプリッタ (PBS) 6 a 及び6 b をもつマッハツェンダー干渉計等により構成されるオフセット回路 (オフセット手段) 7 と、 $\lambda/2$ 板8 と、光路を切り

替えるビームスプリッタ (BS) 9 と、被測定光ファイバ 1 の速波軸および遅波軸に対して所定の角度を有し、被測定光ファイバ 1 を伝搬後の各光波が透過して、測定に必要な偏光成分を取り出すようにした検光子 2 と、検光子 2 を透過した光波を集束させるレンズ 10 と、レンズ 10 を透過した光波を検出する光検出器 (PD) 11 と、光波のスペクトル波形を観測する RF スペクトルアナライザ (RF SA : 検波手段) 12 と、RF SA 12 の観測結果に基づいて PMD を検出するコンピュータ (PC) 14 とを備えている。なお、被測定光ファイバ 1 の出口端 (BS 9 と反対側の端子) 又はその近傍には、反射鏡を設けるようにしてもよい。

このような構成において、光源である F S F レーザ 3 から出力された周波数チャープ光 (測定光) は、偏波制御素子 4、AMP 5 を経て、オフセット回路 7 に入射される。オフセット回路 7 では、PBS 6 a により、F S F レーザ 3 からの周波数チャープ光のうち互いに直交する直線偏光のうち 1 方向の直線偏光光は PBS 6 a を直進させ、他方向の直線偏光光は反射させることで、直交する 2 つの直線偏光成分に分岐するとともに、両者に光路差を与える。このような光路差を与えた 2 つの光波を、オフセット回路 7 内のもう一方の PBS 6 b により再び結合させた後、 $\lambda/2$ 板 8 により各直線偏光成分の偏光方向が所定の偏光角度となり、被測定光ファイバ 1 に入射される。被測定光ファイバの出口端又は出口近傍に設けられた鏡等で反射され、その反射光は、被測定光ファイバ 1 の入射端から出射され、BS 9 を経て、検光子 2 を透過することにより測定に必要な偏光成分が取り出され PD11 により受光され、各直線偏光成分間におけるビート信号を受信する。受信されたビート信号により、PMD 値が算出される (詳細は後述)。

ここで、周波数チャープ光を発生するための F S F レーザ 3 について詳説する。

図 2 における F S F レーザ 3 は、共振器内部に周波数シフト素子である音響光学変調器 (AOM : Acoust-Optic Modulator) を挿入し、ドップラー効果によって周波数シフトされた 1 次回折光を帰還させて発振するレーザである。

本出願人は、F S F レーザ 3 の出力の瞬時周波数成分が時間とともにチャープする複数の成分 (チャープ周波数コム) からなることを理論的・実験的に解明している。

このような共振器では、定在波は存在できず、その瞬時周波数 $\nu_i(t)$ は (2) 式で与えられる。

$$\nu_i(t) = \frac{\nu_{FS}}{\tau_{RT}} t - \frac{q}{\tau_{RT}} \quad (2)$$

5

(2) 式において、ここで、 τ_{RT} は共振器の周回時間 ($1/\tau_{RT}$ は共振器の縦モード周波数)、 ν_{FS} は共振器の周回当たりの周波数シフト量、 q は整数である。

- 10 F S F レーザ 3 で用いられる周波数シフト帰還型の共振器では、ある瞬間に許される瞬時周波数は共振器縦モード周波数 ($1/\tau_{RT}$) 間隔毎に存在し、かつそれぞれの瞬時周波数成分 (周波数コム成分) は、共振器周回当たりの周波数シフト量に等しい割合 ($\gamma = \nu_{FS} / \tau_{RT}$) で連続に周波数チャープを受けている。また、周波数チャープ幅 ν_{BW} は利得媒質のスペクトル形状によりある一定の幅に制限され、各周波数成分は利得のスペクトル形状に従って強度変化しながら周波数チャープする。
- 15

図 3 は、F S F レーザ 3 の出力の瞬時周波数成分を模式的に表した図である。

図中グレー階調はその強度変化を示している。また、チャープレート γ は、 ν_{FS} / τ_{RT} となっている。

- 図 4 は、F S F レーザ 3 の詳細構成を示すブロック図である。F S F レーザ 1 は、周波数シフト素子である AOM (伝搬媒質は、例えば、 TeO_2) 21 を用いて、リング状のレーザ共振器を構成している。このレーザ共振器内には、光ファイバとの整合性に優れたエルビウム添加ファイバ (E D F : 例えば、 Er^{3+} ドープ量 900ppm、ファイバ長 15m) 22 と、励起光源である半導体レーザ (L D : 例えば、 $1.48 \mu\text{m}$ 帯、最大励起電力 67mW) が入射される波長分割用光結合器 (WDM : Wavelength Division
- 20

Multiplexing coupler) 23 と、光アイソレータ(OI : Optical Isolator) 24 と、出力カプラ(Output Coupler、分岐比は、例えば、90 : 10 (10dB)) 25 と、偏波制御素子(PC : Polarization Controller) 26 と、コリメータ 27 と、バンドパスフィルタ(BPF) 28 と AOM 21 を駆動する信号発生器(SG) 29 と、を
5 備える。

AOM 21 は一対のコリメータ 27 の間に挿入されており、その回折効率を含む光結合効率は、例えば25%である。共振器一周当たりの周波数シフト量 ν_{FS} は、AOM 21 の駆動周波数に等しく、例えば120MHzであり、共振器縦モード周波数 $1/\tau_{RT}$ は、例えば9.38MHzである。これにより、周波数が変化する速さを表すチャープ
10 レート $\gamma = \nu_{FS} / \tau_{RT}$ は1.13PHz/sとなる。

図5は、図4のFSFレーザ3の発振スペクトルを光スペクトラムアナライザで観測した結果を示す図である。この例では、発振スペクトルの半値全幅より、周波数チャープ幅 ν_{BW} は110GHzである。また、発振の中心波長は1.556 μm である。

なお、周波数シフト素子としてAOMの代わりに音響光学波長可変フィルタ
15 (Acousto-Optic Tunable Filter : AOTF) を用いるようにしてもよい。AOTF は、狭帯域な波長透過特性をもつ周波数シフト素子である。AOTFにより、発振波長の電子同調が可能となるので、共振器内のBPFが不要となり、装置構成の簡素化が可能となる。

つぎに、FSFレーザを用いたPMD測定について詳述する。

20 図6は、検波時の瞬時周波数成分を示す図である。FSFレーザ3からの周波数チャープ光が被測定光ファイバ1を伝搬し、さらに検光子2を透過した後に検波すると、遅延時間 t_{offset} に比例したビート信号 (f_{Boffset} : 以下、オフセット周波数と呼ぶ) の両側に、PMDの遅延時間に依存するビート信号 f_{B1} , f_{B2} が生じる。これら3つのビート信号 f_{Boffset} , f_{B1} , f_{B2} の信号強度は、光波の被測定光ファイバ
25 1への入射角度ならびに検光子2の角度に依存する。

ここで、検波時におけるビート信号強度は以下の行列式で与えられる。

$$I \propto \left\| \begin{pmatrix} \sin \beta & 0 \\ 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp[-j\tau] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \frac{1/\sqrt{2}}{\exp[-jt_{\text{offset}}]/\sqrt{2}} e(t) \right\|^2 \quad (3)$$

5

$$e(t) = \exp \left[- \left(\frac{\gamma}{v_{BW}/2} \right)^2 \frac{\ln}{2} \left[j2\pi \left(\phi v_0 t + \frac{\gamma}{2} t^2 + \Phi_0 \right) \right] \right] \quad (4)$$

図7は、オフセット回路における光波及び検光子の透過成分についての説明図である。図8は、光波の入射角度とビート強度との関係を示す図である。

図7 (a) 及び (b) に示すように、(3) 式および (4) 式における α はオフセット回路7のpath2成分と被測定光ファイバ1の遅波軸とのなす角、 β は検光子2と遅波軸とのなす角を表している。

(3) 式の各行列成分は左からそれぞれ、検光子2、被測定光ファイバ1のPM D τ 、レーザ出力光の入射角度ならびにオフセット回路7の遅延時間 t_{offset} の効果を示している。ここで、検光子2の角度が理想的に $\beta = 45\text{deg}$ に設定されている場合、ビート周波数は (5) 式で与えられる。

$$f_B = f_{\text{Boffset}} + \cos 2\alpha \gamma \tau \quad \dots (5)$$

図8 (a), (b), (c) は被測定光ファイバ1への光波の入射角度 α とビート成分との関係を示す図である。 $\alpha = 0\text{deg}$ すなわちpath1成分と速波軸が一致している場合、全体の遅延時間は $t_{\text{offset}} + \tau$ となるため、図8 (a) に示すように、ビートスペクトルはオフセット周波数よりも高周波側 (f_{B1}) に生じる。

逆に、 $\alpha = 90\text{deg}$ の場合はpath2成分と速波軸が一致し、全体の遅延時間は $t_{\text{offset}} -$

τ となるため、図 8 (b) に示すように、ビートスペクトルはオフセット周波数より低周波側(f_{B2})に生じる。

一方、 α が 0 deg と 90 deg の中間付近では、図 8 (c) に示すように、 f_{B1} および f_{B2} のそれぞれのビートスペクトルが存在するが、PMD が小さい場合は、2 つのスペクトルが重なる。そこで、これらのスペクトルを、(4) 式の理論式でフィッティングすることでビート周波数を求めている。

以上より、入射角度を変化させた際のビート周波数の変化量を Δf_B とすると、PMD 値 τ は以下の式で求められる。

$$\Delta f_B = (f_{B1} - f_{B2}) / 2 \quad \dots (6)$$

$$\tau = \Delta f_B / \gamma \quad \dots (7)$$

本実施の形態では、 $\lambda/2$ 板 8 を用いて計測用光の偏光方向を制御し、その回転角度 θ をパラメータとしてビート信号の中心周波数を測定し、その結果のピーク・ツー・ピーク値 Δf_B より PMD 値が求められる。より詳細には、まず、検光子 2 を被測定光ファイバ 1 の速波軸及び遅波軸に対して 45 度に設定する。そのためには、 $\lambda/2$ 板 8 を 180 度ずつ回転させてビートスペクトル強度がフラットになる条件に固定することにより、設定することができる。つぎに、 $\lambda/2$ 板 8 を半回転させて、ビート中心周波数のピーク・ツー・ピークの値を読み取る。

この値が $2 \Delta f_B$ となるので、(7) 式より PMD 値を求めることができる。

また、本実施の形態においては、周波数チャープ光が光ファイバ 1 を伝搬後、さらに検光子 2 を透過した後で検波し、ビート周波数の変化量を測定して (7) 式により PMD 値を求めるため、簡易かつ高感度に PMD 値を求めることができる。また、本実施の形態は、既設の光通信網における PMD 測定も可能であり、測定系の構成が複雑になるおそれもない。

次に、本発明の偏波モード分散測定装置により測定した結果について説明する。
まず、偏波面保存光ファイバ(PMF)を用いた原理実証実験として、光ファイバ内

部の複屈折性が高く、偏波モード結合の存在しないPMFの測定結果を示す。

図9(a)はオフセット回路7を透過した後の光波の入射角度とビートスペクトル強度との関係を示す図、図9(b)はオフセット回路7を透過した後の光波の入射角度とビート周波数との関係を示す図である。なお、各図は、検光子の角度 β を
5 パラメータとして測定したものであり、それぞれ実線は理論計算結果を表し、破線は測定結果を表している。

図9(a)の結果より、ビートスペクトル強度がほぼ一定の値になる状態は、検光子2の角度が $\beta=45\text{deg}$ に設定されている場合である。また、図9(b)より、このときのビート周波数の変化量は $2\Delta f_b=400\text{Hz}$ である。この結果から、PMD
10 値 τ は 0.18ps (1.51ps/m)と求められた。

次に、実際に光通信に用いられる単一モード光ファイバ(SMF)の測定結果を示す。ここでは、通常の光通信を想定し、光ファイバ内部で偏波モード結合が存在する場合として、単一モードファイバ(この例では、ファイバ長 $L=20\text{km}$)を使用して、PMD測定を行った結果を示す。

15 図10(a)は入射角度とビートスペクトル強度との関係を示す図、図10(b)は入射角度とビート周波数との関係を示す図である。なお、実線は理論計算結果を示している。図10(a)より、上述した原理実証実験結果と同様に、ビートスペクトル強度は入射角度によらず、ほぼ一定の強度を保つ状態が検光子2の角度 β が45度の場合である。図10(b)より、ビート周波数の変化量は $2\Delta f_b=390\text{Hz}$
20 ある。この結果から、この例では、PMD値 τ は、 0.17ps ($0.04\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$)と求められた。

また、図11は光ファイバ長とPMDとの関係を示す図である。図示のように、PMD値 τ が光ファイバ1長の平方根に比例して増大している様子がわかる。

なお、ここで、今回のPMD測定における測定精度は、上述した(6)式よりビート
25 周波数の読取精度に起因する。

図12はビート周波数の読取精度を評価した結果を示す図である。同図の結果よ

り、FSFレーザ3を用いたPMD測定精度は、 $d\tau = \pm 0.01\text{ps}$ であることが求められる。測定精度は、レーザ出力光の周波数チャープ幅およびスペクトラムアナライザの読取精度に依存する。したがって、より高精度の測定を行うには、周波数チャープ幅を広帯域にし、かつ、周波数カウンタを用いてビート周波数の測定を行う必要がある。

つぎに、本発明の他の実施の形態を説明する。

図13に、本発明に係る偏波モード分散測定装置の第2の実施の形態の全体構成を示すブロック図を示す。

この実施の形態では、上述の構成のほかに、駆動部101、102、制御部103、バンドパスフィルタ110、周波数カウンタ(Frequency Counter)111、パワーメータ(Power meter)112を備える。

PMD測定を行う上で重要となる検光子の角度の最適条件は入射角度によらず、ビートスペクトル強度が一定の状態を保つ条件を満たせば良いことから、 $\lambda/2$ 板8および検光子2をモーター等の駆動部101、102およびモータードライバ等の制御部103により自動制御することで、これまで手動でおこなってきた測定作業を全自動にすることが可能となる。

詳細には、まず、駆動部102を制御部103で制御して、検光子2を被測定光ファイバ1の速波軸及び遅波軸に対して45度に設定する。そのためには、 $\lambda/2$ 板8を180度ずつ回転させてビートスペクトル強度がフラットになる条件に固定することにより、設定することができる。つぎに、駆動部101を制御部103で制御して、 $\lambda/2$ 板8を半回転させて、ビート中心周波数のピーク・ツー・ピークの値を読み取る。この値が微小変動量 $2\Delta f_B$ となるので、(1)式に代入することによりPMD値を求めることができる。

また、ビート周波数の測定には、現在使用しているRFスペクトルアナライザ(Real Time Spectrum Analyzer)の代わりに、周波数カウンタ111、パワーメータ112およびバンドパスフィルタ(BPF)110を用いることで、より簡素な装置

構成が可能である。

以下に、チャープ光生成手段の他の実施の形態を示す。これらのチャープ光生成手段は、上述の測定装置におけるFSFレーザ3に置換され得る構成である。

図14に、チャープ光生成手段の他の実施の形態2の構成図を示す。図4における周波数チャープ素子として音響光学波長可変フィルタ(AOTF)200を用い、BPF28を省略したものである。駆動信号源である信号発生器29をPC14で制御することで、発振波長を電子制御できる。

図15に、チャープ光生成手段の他の実施の形態3の構成図を示す。図4における周波数チャープ素子として、媒体に光ファイバを用いた全ファイバ構成の音響光学素子(All-fiber AOM)300を用い、コリメータ27を省略したものであるり、測定装置を全ファイバ構成にできる。

なお、周波数チャープ光源は、時間に対して発振周波数がシフトするような光源であれば、適宜のものを採用することができる。また、以上のべたように、被測定光ファイバ1の入射側で測定する場合のほかに、出口側に測定系を設けるようにしても良い。また、上述の実施の形態の全体構成において、挿入損失の低減のため、ビームスプリッタ9の代わりにサーキュレータを用いるようにしてもよい。

産業上の利用可能性

以上詳細に説明したように、本発明によれば、周波数チャープ光が光ファイバを伝搬後、さらに検光子を透過した後で検波し、このとき得られる自己ビート信号に基づいて偏波モード分散を測定するため、簡易な構成で高感度に偏波モード分散を測定することができる。また、本発明によれば、PMD値が小さい場合にも、発生するビート信号がDC成分の中に埋もれることなく、偏波モード分散測定を十分可能とする。

請 求 の 範 囲

1. 周波数が時間に比例して変化する周波数チャープ光を生成するチャープ光生成手段と、

- 5 前記チャープ光生成手段により生成された周波数チャープ光に対して、直交する2つの直線偏光成分に分岐して、両直線偏光成分に光路差を与えるオフセット手段と、

前記オフセット手段からの周波数チャープ光の直線偏光方向を所定の角度回転させる波長板と、

- 10 前記波長板を通過した周波数チャープ光が被測定光ファイバに伝搬した後に、測定に必要な偏光成分を透過する検光子と、

前記検光子を透過した光波を検波し、検波された光波のビート信号に基づいて、被測定光ファイバの偏波モード分散値を検出する検波手段と

を備えた偏波モード分散測定装置。

- 15 2. 前記検光子は、

被測定光ファイバの速波軸および遅波軸に対して略45度の角度となるように配置されることを特徴とする請求項1に記載の偏波モード分散測定装置。

3. 前記チャープ光生成手段は、

- 20 周波数をシフトするための周波数シフト素子を有し、周波数シフトされた回折光を帰還させて周波数チャープ光を生成することを特徴とする請求項1又は2に記載の偏波モード分散測定装置。

4. 前記チャープ光生成手段は、

利得媒質、励起光源、光結合器、及び、周波数シフト素子をリング状に接続した

リング共振器を有することを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれかに記載の偏波モード分散測定装置。

5. 前記チャープ光生成手段は、

前記リング共振器内の光波が前記周波数シフト素子により共振器周回毎に受ける周波数シフト量に等しい割合で周波数が増加する周波数チャープ光を生成することを特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれかに記載の偏波モード分散測定装置。

6. 前記チャープ光生成手段は、

バンドパスフィルタをさらに備え、

周波数チャープ光の発振波長を同調させることを特徴とする請求項 1 乃至 5 のいずれかに記載の偏波モード分散測定装置。

7. 前記チャープ光生成手段は、

周波数シフト素子として音響光学波長可変フィルタを用い、その駆動周波数により発振波長を同調させることを特徴とする請求項 1 乃至 5 のいずれかに記載の偏波モード分散測定装置。

8. 前記チャープ光生成手段は、

周波数シフト素子として媒体に光ファイバを用いた全ファイバ構成の音響光学素子を用い、測定装置を全ファイバ構成にできることを特徴とする請求項 1 乃至 6 のいずれかに記載の偏波モード分散測定装置。

9. 前記チャープ光生成手段は、

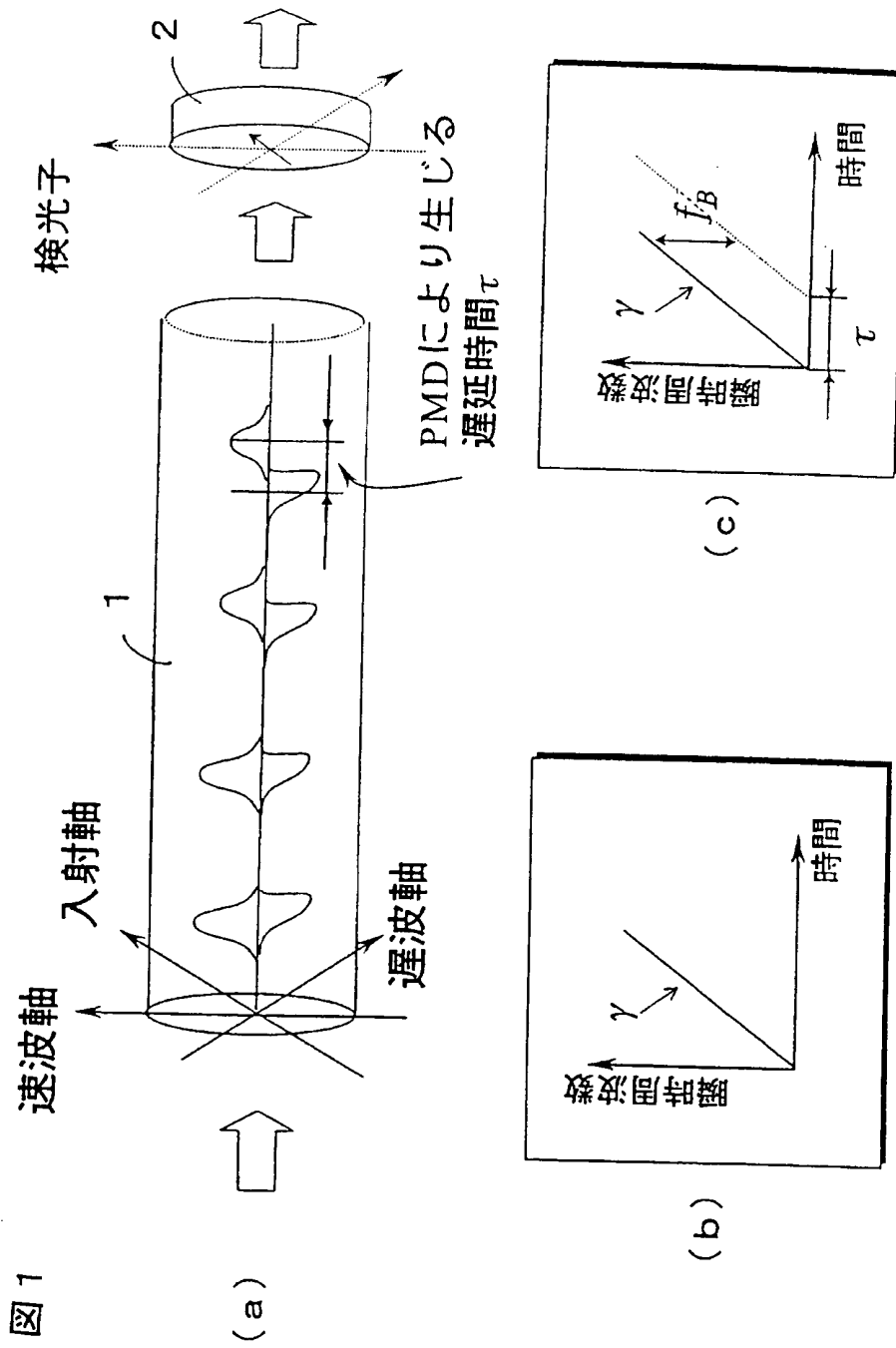
時間に対して発振周波数がシフトするような光源を備えるようにしたことを特徴とする請求項 1 に記載の偏波モード分散測定装置。

10. 前記検光子及び前記波長板の回転角度を制御する駆動部をさらに備え、

前記検光子の被測定光ファイバの速波軸又は遅波軸に対する角度を固定し、

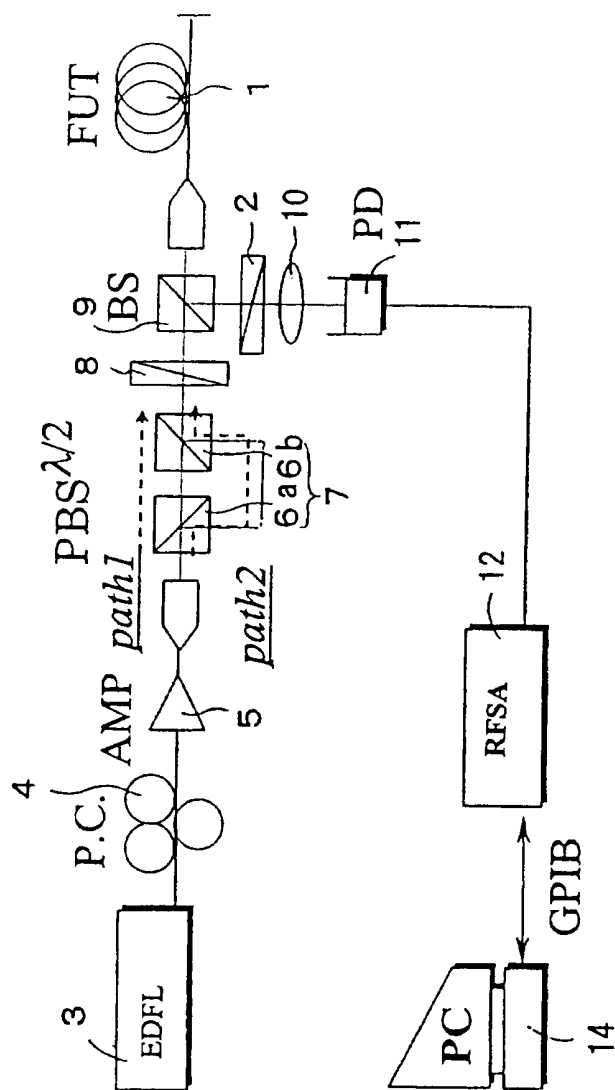
前記波長板の回転角度をパラメータとしてビート信号の中心周波数を測定し、測定されたピーク値に基づき偏波モード分散値を測定するようにしたことを特徴とする請求項 1 乃至 9 のいずれかに記載の偏波モード分散測定装置。

- 1 1. 周波数が時間に比例して変化する周波数チャープ光を生成するステップと、
- 5 生成された周波数チャープ光に対して、直交する 2 つの直線偏光成分に分岐して、両直線偏光成分に光路差を与えるステップと、
周波数チャープ光の直線偏光方向を所定の角度回転させるステップと、
光路差を与えられた周波数チャープ光を被測定光ファイバに伝搬するステップと、
- 10 周波数チャープ光が被測定光ファイバに伝搬した後に、測定に必要な偏光成分を透過するステップと、
透過した後の光波を検波し、検波された光波のビート信号に基づいて、被測定光ファイバの偏波モード分散値を検出するステップと
を備えた偏波モード分散測定方法。
- 15 1 2. 必要な偏光成分を透過するように、検光子の被測定光ファイバの速波軸又は遅波軸に対する角度を固定するステップと、
被測定光ファイバに入射される直線偏光方向を所定の角度回転させ、その回転角度をパラメータとしてビート信号の中心周波数を測定し、測定されたピーク値に基づき偏波モード分散値を測定するようにしたことを特徴とする請求項 1 1 に記載
- 20 の偏波モード分散測定方法。



OFDRを用いたPMD測定の実理

2
✕



FSFレーザーによるPMD測定系

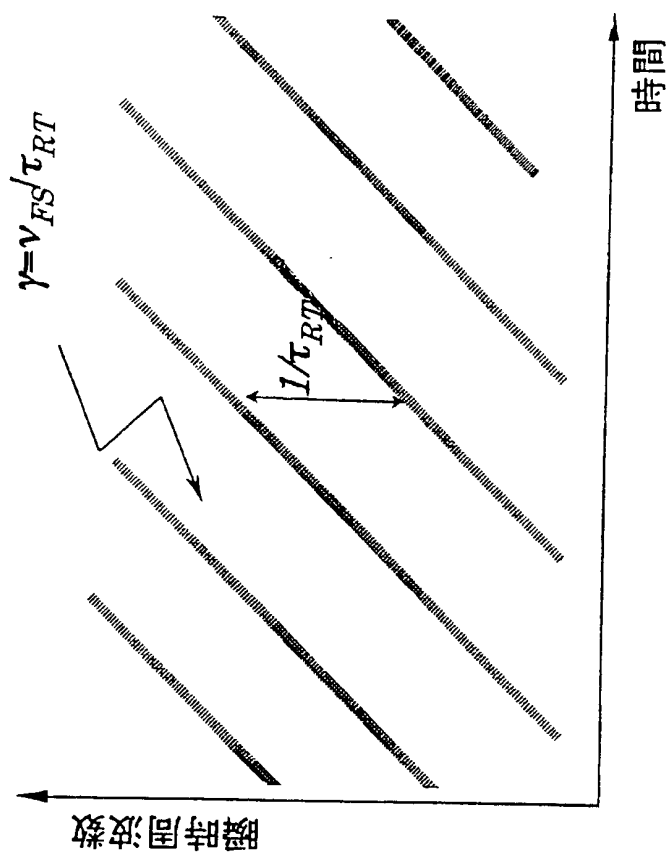


図 3

周波数シフト帰還型レーザ出力の
チャープ周波数コム特性

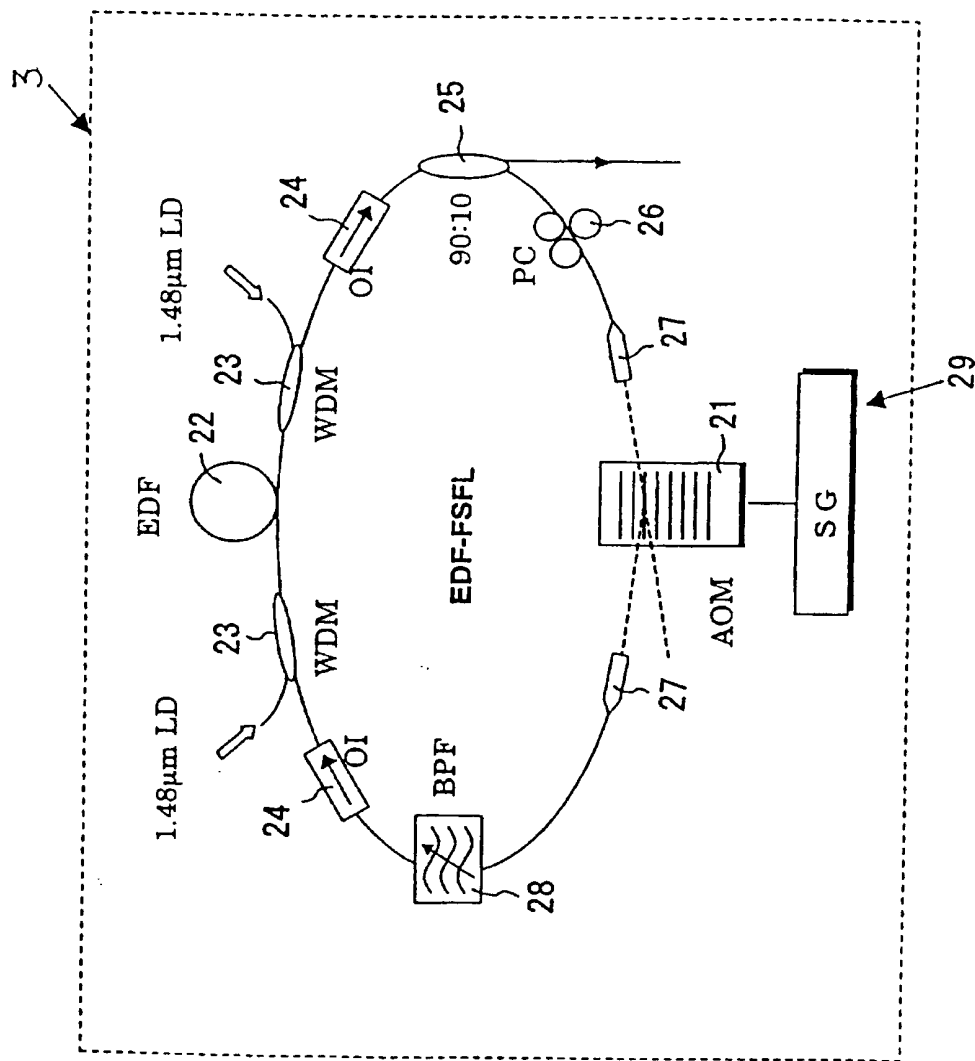
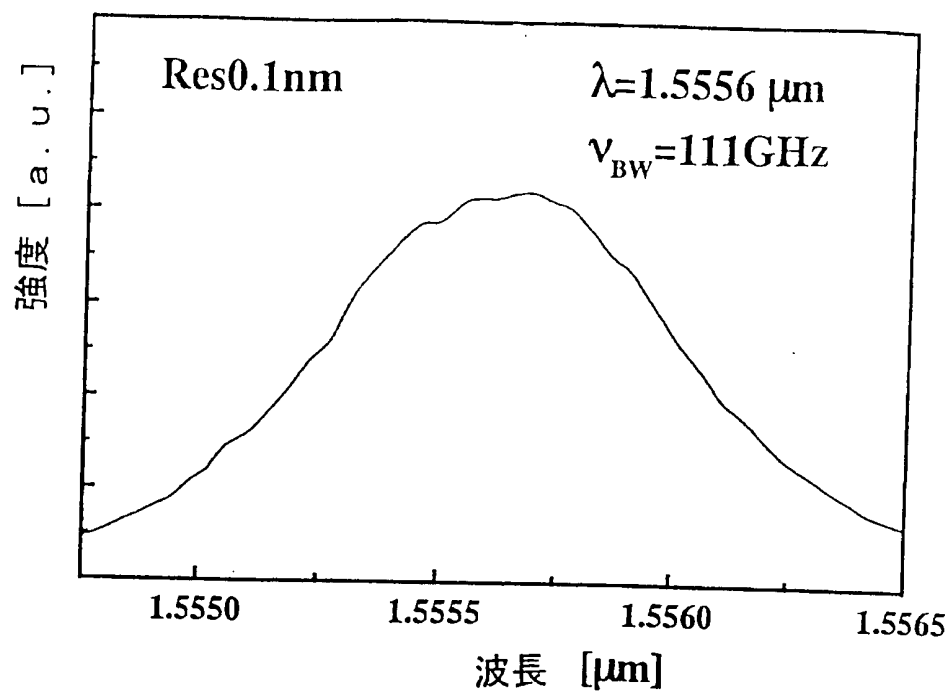


图 4

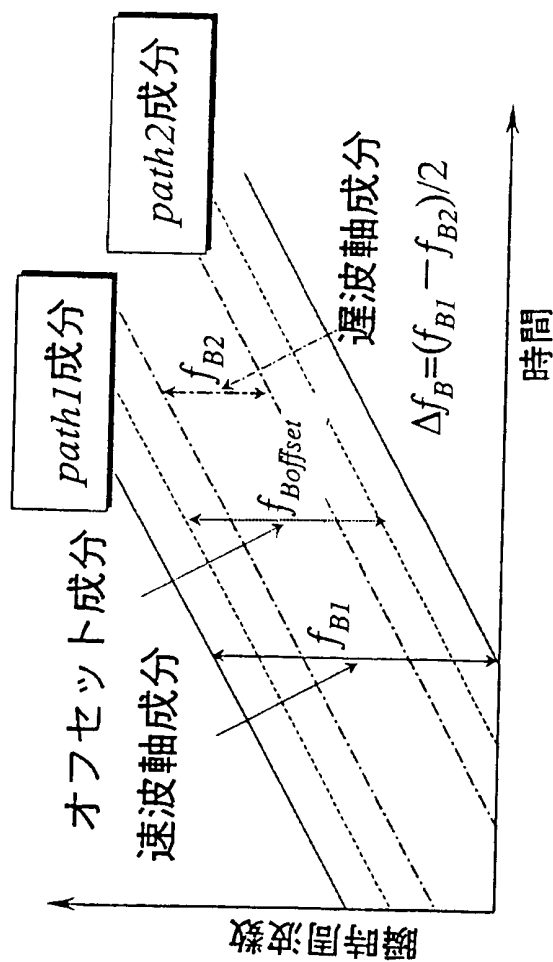
5 / 15



光スペクトラムアナライザを用いた
FSFレーザの発振スペクトル波形
(測定分解能は0.1nm)

図 5

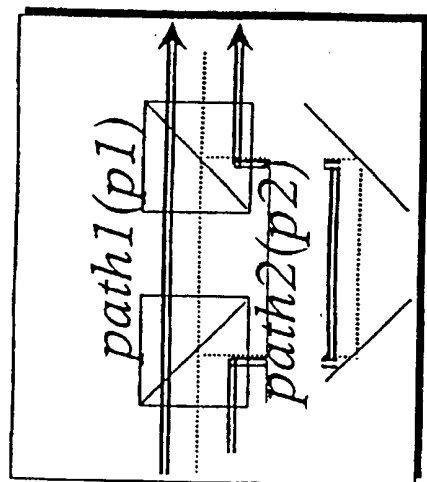
図 6



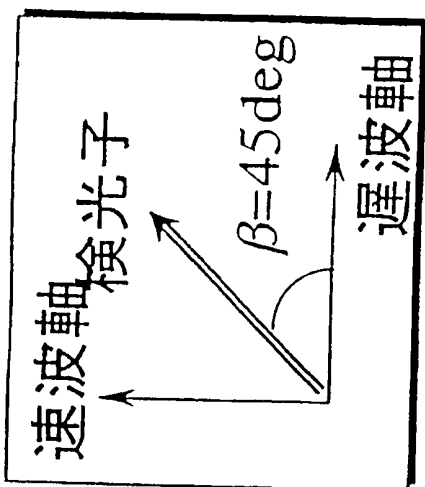
検波時の瞬時周波数成分

(2つの光路成分のうち実線は速波軸、一点破線は遅波軸、点線はオフセット成分を表す)

図 7



(a)



(b)

8 / 15

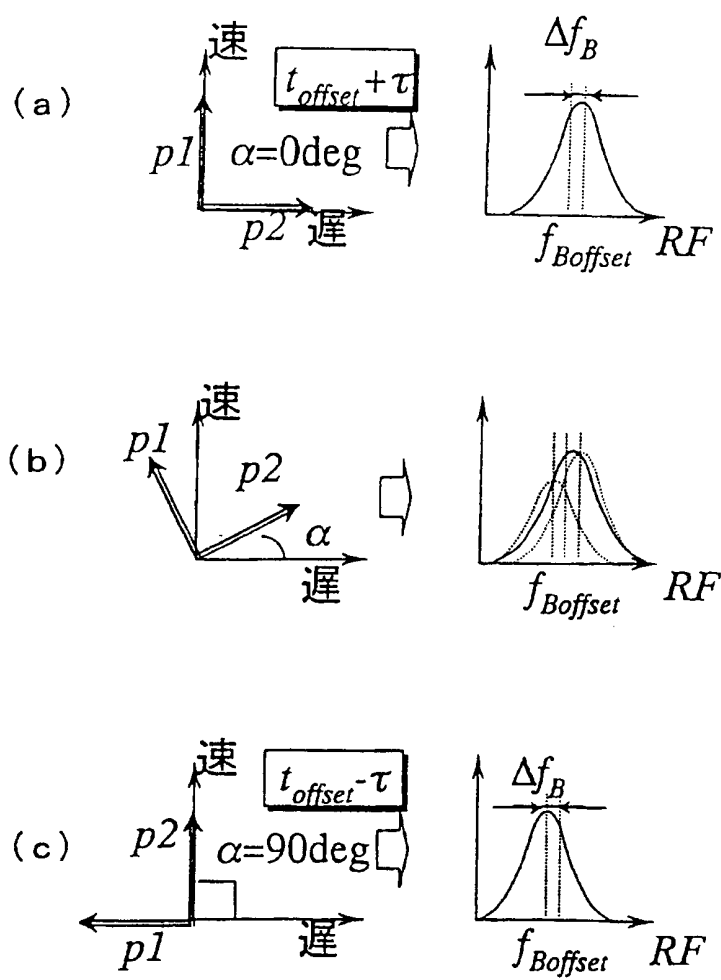


図 8

9 / 15

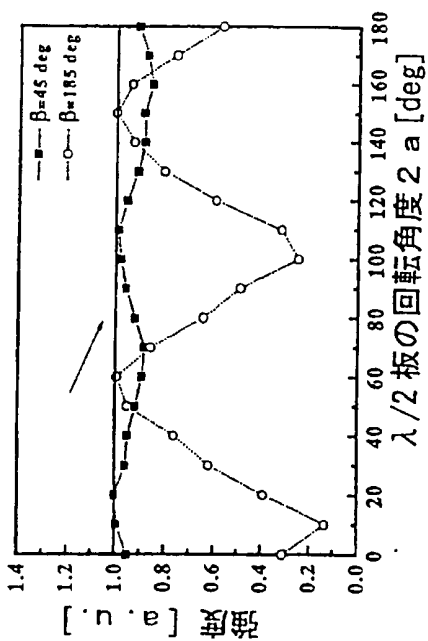
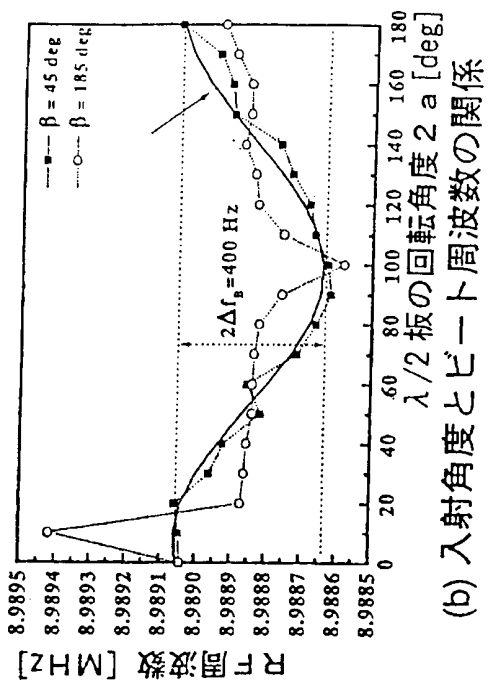
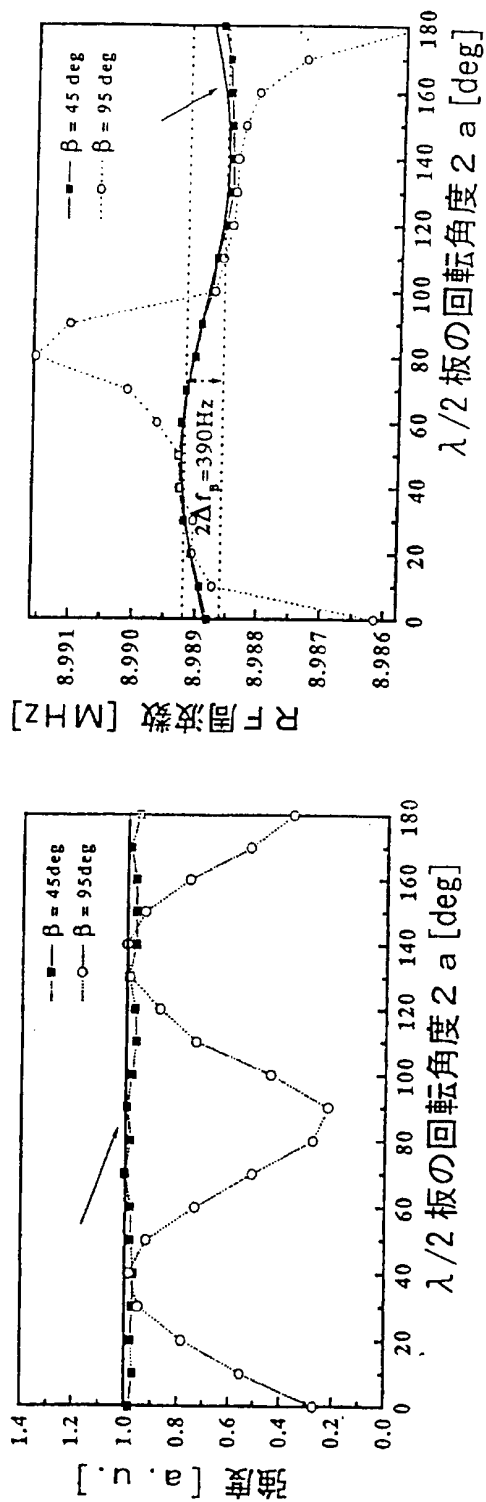
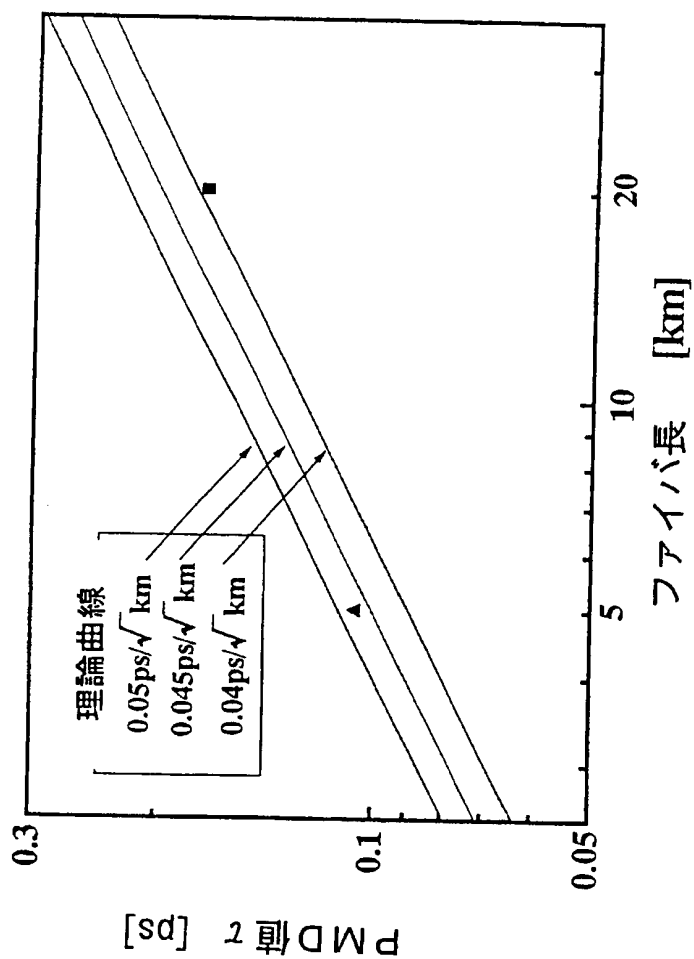
PMD測定結果(PMF : $L=11.9\text{cm}$)

図 10



(a) 入射角度とビートスペクトル強度の関係 (b) 入射角度とビート周波数の関係

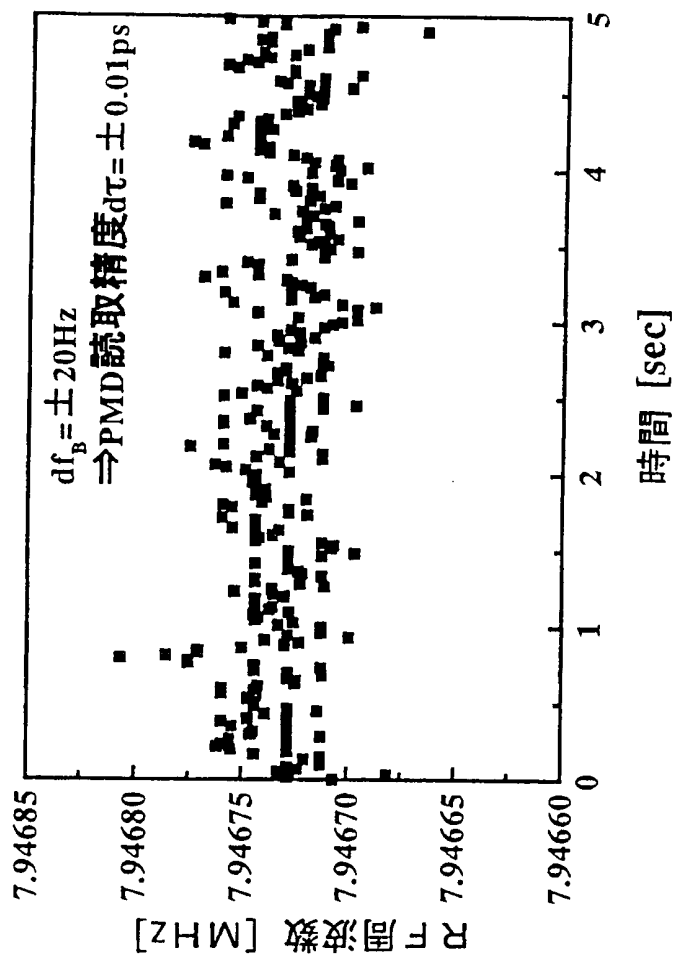
PMD測定結果(SMF: $L=20\text{km}$)



ファイバ長とPMD値の関係

12 / 15

図 12



PMD測定精度評価結果

13/15

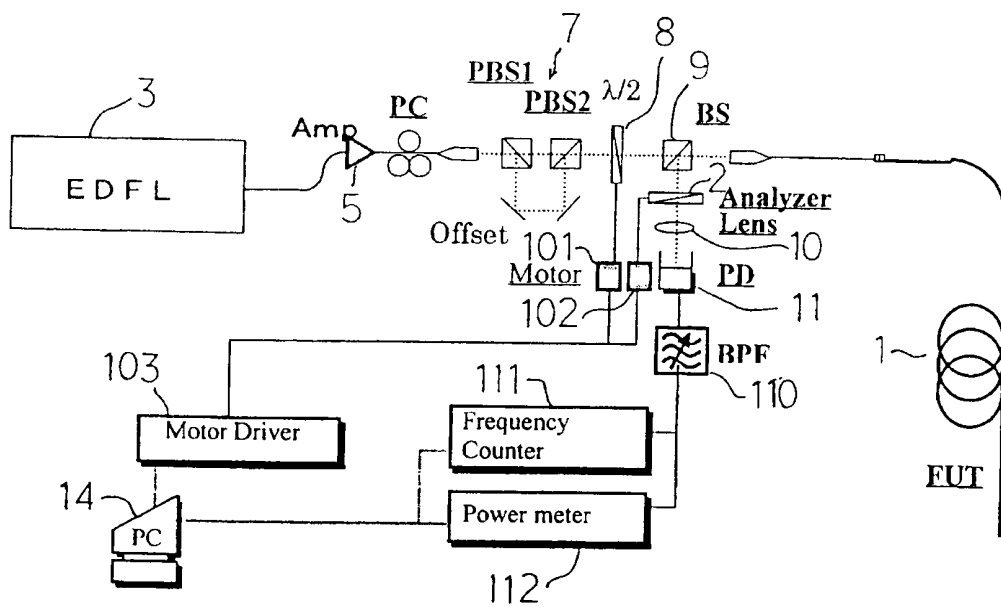


図 13

14 / 15

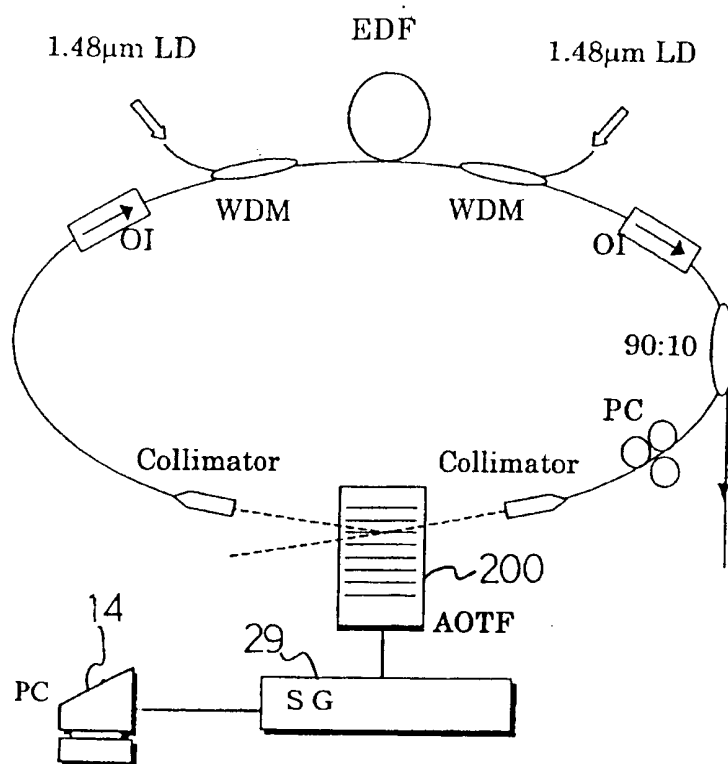


図 14

15 / 15

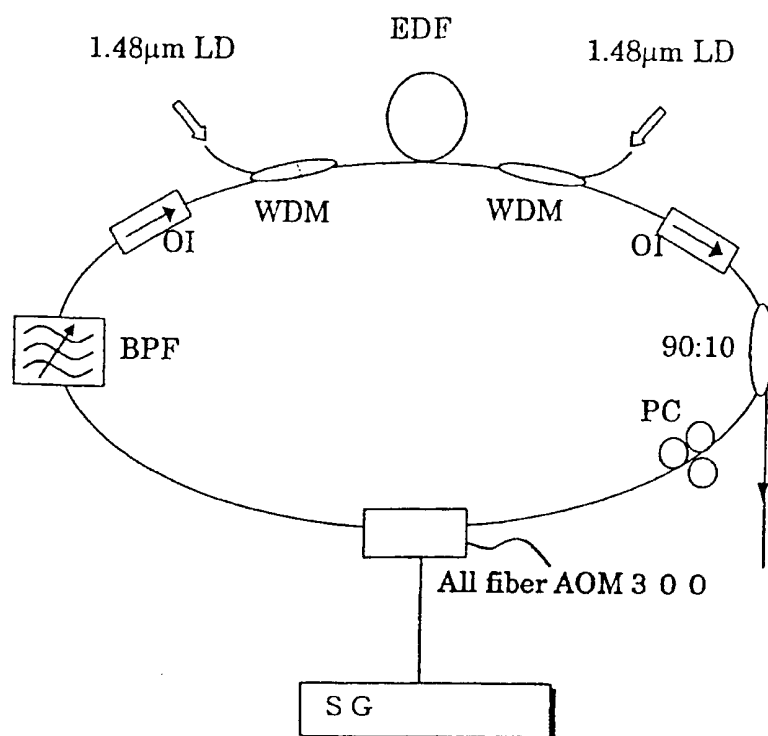


図 15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP00/06509

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl.⁷ G01M11/02

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl.⁷ G01M11/02

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2000

Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2000 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2000

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US, 5717489, A (Advantest Corporation, Ozeki Takeshi), 10 February, 1998 (10.02.98), Full text; Figs. 1 to 2 & JP, 9-264814, A	1-12
A	JP, 61-47533, A (Nippon Telegr. & Teleph. Corp. <NTT>), 08 March, 1986 (08.03.86), Full text; Figs. 1 to 3 (Family: none)	1-12

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
04 December, 2000 (04.12.00)Date of mailing of the international search report
12 December, 2000 (12.012.00)Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ G01M11/02

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ G01M11/02

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1922-1996年
 日本国公開実用新案公報 1971-2000年
 日本国登録実用新案公報 1994-2000年
 日本国実用新案登録公報 1996-2000年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	US, 5 7 1 7 4 8 9, A (Advantest Corporation , Ozeki Tak- eshi) 10. 2月. 1998年 (10. 02. 98) 全文, 第1-2図 & JP, 9-264814, A	1-12
A	JP, 61-47533, A (日本電信電話株式会社) 8. 3月. 1986年 (08. 03. 86) 全文, 第1-3図 (ファミリーなし)	1-12

☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
 「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

04. 12. 00

国際調査報告の発送日

12.12.00

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)
 郵便番号100-8915
 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

菊井 広行

印

2W

7324

電話番号 03-3581-1101 内線 3252